

Detección no destructiva de semillas en mandarina con

imágenes de Resonancia Magnética ultrarrápidas: Comparativa entre métodos de segmentación automática

Resumen

La Imagen de Resonancia Magnética (IRM) se ha propuesto para adquirir imágenes de la estructura interna de mandarinas para la identificación no destructiva de semillas. Se han investigado dos tipos de secuencias rápidas de IRM: una de tipo eco de gradiente y otra de tipo espiral-radial, con tiempo de adquisición de 484 ms para la primera y 240 ms para la segunda. La opción espiral-radial permite un sobremuestreo del área central del espacio-k en la que está contenida la información sobre el contraste en las imágenes de RM y con ello la posibilidad de segmentación de las semillas. Se aplican tres técnicas de segmentación para el post-procesado de las imágenes: una basada en regiones, una basada en la varianza del histograma unidimensional y una basada en la varianza del histograma bidimensional, siendo la última la que ha proporcionado los resultados más prometedores. Parámetros como el perímetro, la compacidad, la distancia máxima al centro de gravedad y la relación entre altura y ancho se utilizan en una función lineal discriminante mediante la que la identificación de mandarinas con semilla se puede conseguir con el 100% de exactitud cuando se utilizan secuencias espiral-radial y con el 98,7% cuando se obtienen imágenes de eco de gradiente.

Palabras Clave: Análisis de imagen, Clasificación, Cítricos, Calidad interna, Fruta.

Abstract

Non-destructive mandarin seeds detection using images of Magnetic Resonance: Comparison between methods of automatic segmentation. Magnetic Resonance Imaging (MRI) is proposed to acquire images of the internal structure of mandarins for non-destructive seed identification. Two different types of fast MRI sequences are investigated: a gradient echo and a spiral-radial, with 484 ms acquisition time for the former compared to 240 ms for the latter. The radial-spiral option allows to over sample the central area of the k-space maintaining the contrast within the MRI images and so the feasibility of seed segmentation. Three segmentation techniques are applied for image post-processing: region-based, one-dimension histogram variance, and two-dimension histogram variance, among which the latter procedure has demonstrated to give the most promising results. Image features including perimeter, compactness, maximum distance to the gravity centre, and aspect ratio are employed in a linear discriminant function, by which the seed identification of mandarins can be achieved with 100% accuracy using radial-spiral sequence and 98.7% accuracy with gradient echo images.

Key words: Image analysis, Classification, Citrus, Internal quality, Fruit.

Introducción

El la actualidad, el reto de la implementación de la técnica de Imagen de Resonancia Magnética (IRM) en la inspección de calidad interna implica el cumplimiento de, principalmente, tres requisitos: el desarrollo de secuencias rápidas (por debajo de 1s), la adquisición en línea

(hasta 0,5 m/s) y el uso de tecnología de bajo campo magnético (por debajo de 1 Tesla). Trabajos recientes han mostrado que las dos primeras condiciones pueden alcanzarse con el uso de secuencias rápidas de eco de gradiente (FLASH) y ultrarrápidas espirales-radiales (COMSPIRA) a velocidades de hasta 90 mm/s (HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ *et al.*, 2005 y 2006) mientras que

la tercera se encuentra en estudio (HILLS y WRIGHT, 2006).

El progresivo acortamiento de los tiempos de adquisición en las secuencias rápidas y ultrarrápidas de IRM junto con el incremento de la calidad de las imágenes obtenidas está acrecentando el interés por la segmentación automática y la extracción de parámetros ca-

racterísticos. Este tipo de segmentación consiste en la partición, supervisada o no supervisada, de la imagen en regiones no superpuestas con características diferentes como, por ejemplo, intensidad o textura. Las técnicas de segmentación se pueden dividir en cuatro categorías: la basada en el histograma, en regiones, en contornos, y la basada en clasificaciones (DU y SUN, 2004). Los métodos basados en el histograma son preferibles cuando en la imagen hay únicamente dos objetos, como es el caso de una (o varias) semillas en una matriz de pulpa. Además, presentan la ventaja de ser sencillos y con bajos requerimientos en computación. Los métodos basados en regiones, aunque necesitan una computación más intensa no requieren información *a priori* y, por ello,

Fórmula 1.

Método 1DHVT	Método 2DHVT
$\sigma(t) = w_i(t)w_o(t)[\mu_i(t) - \mu_o(t)]^2$	$\sigma(k,l) = w_i(k,l)w_o(k,l)[\mu_i(k,l) - \mu_o(k,l)]^2$
$w_i(t) = \sum_{i=1}^L p(i)$	$w_i(k,l) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i,j)$
$w_o(t) = \sum_{o=1}^L p(o) = 1 - w_i(t)$	$w_o(k,l) = \sum_{o=1}^L \sum_{j=1}^L p(o,j)$
$\mu_i(t) = \sum_{i=1}^L p(i)w_i(t)$	$\mu_i(k,l) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L ip(i,j)w_i(k,l)$
$\mu_o(t) = \sum_{o=1}^L p(o)w_o(t)$	$\mu_o(k,l) = \sum_{o=1}^L \sum_{j=1}^L op(o,j)w_o(k,l)$

Fórmula 2.

Momento de segundo orden (SOM)	Compacidad (C)	Aspecto
$1/N \sum_i (x_i - x')^2 (y_i - y')^2$	$\pi \cdot RHI \cdot P^{-2}$	máx_long/máx_anch

son también de interés para el procesamiento automático de imágenes.

Los objetivos de este trabajo son, por un lado, evaluar si la calidad de las imágenes FLASH y COMSPIRA per-

mite una segmentación automática fiable; y, además, comparar la capacidad de distintas técnicas de segmentación para la detección de semillas.

Materiales y métodos

El material vegetal consistió en 78 mandarinas, variedad Nardocott, proporcionadas por un distribuidor de cítricos de Valencia. Las muestras se estabilizaron a temperatura ambiente (22°C) antes de la adquisición de las imágenes.

Los experimentos se llevaron a cabo con un equipo de RM de 4.7 T y una antena de volumen, en cuyo centro se colocaron las muestras de forma individual para la adquisición de las imágenes. Dicha adquisición fue llevada a

cabo por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el procesamiento de imagen se desarrolló en colaboración con el University College Dublin (UCD, National University of Ireland).

Las secuencias de IRM seleccionadas para este trabajo son la *Fast Low Angle SHot* (FLASH) y la *COMBined SPIral Radial* (COMSPIRA) consideradas rápida y ultrarrápida respectivamente. Éstas permiten no sólo aumentar el rendimiento de la inspección en términos de muestras por unidad de tiempo, sino que minimizan la pérdida de calidad de la imagen debida al movimiento de la muestra. Las secuencias FLASH se caracterizan por el rellenado lineal de los datos del espacio de frecuencias espaciales (espacio- k), una línea por cada excitación de radiofrecuencias; y por la ausencia de pulso de refocalización, lo que acorta el tiempo total de adquisición (Figura 1). Las secuencias COMSPIRA se caracterizan por el rellenado radial (espiralidad 0) o espiral (espiralidad >0) del espacio- k con una rápida adquisición de los puntos centrales y sobremuestreo en dicha región, donde está contenida la información sobre el contraste (Figura 1).

Se adquirieron imágenes FLASH de las 78 mandarinas con un tiempo de recuperación (TR) = 7.6 ms, tiempo de eco (TE) = 2.5 ms (tiempo de adquisición 484 ms); y ángulo de inclinación = 10 grados. Las imágenes COMSPIRA de 15 mandarinas se obtuvieron con 36 trayectorias, 512 puntos por trayectoria y va-

Figura 1. Representación del espacio- k característico de las secuencias FLASH (izquierda) y COMSPIRA (derecha).

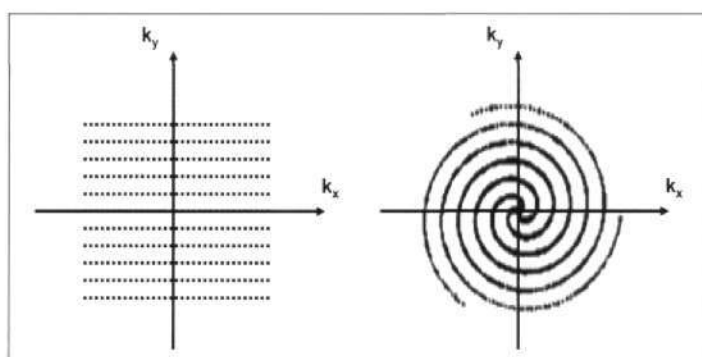
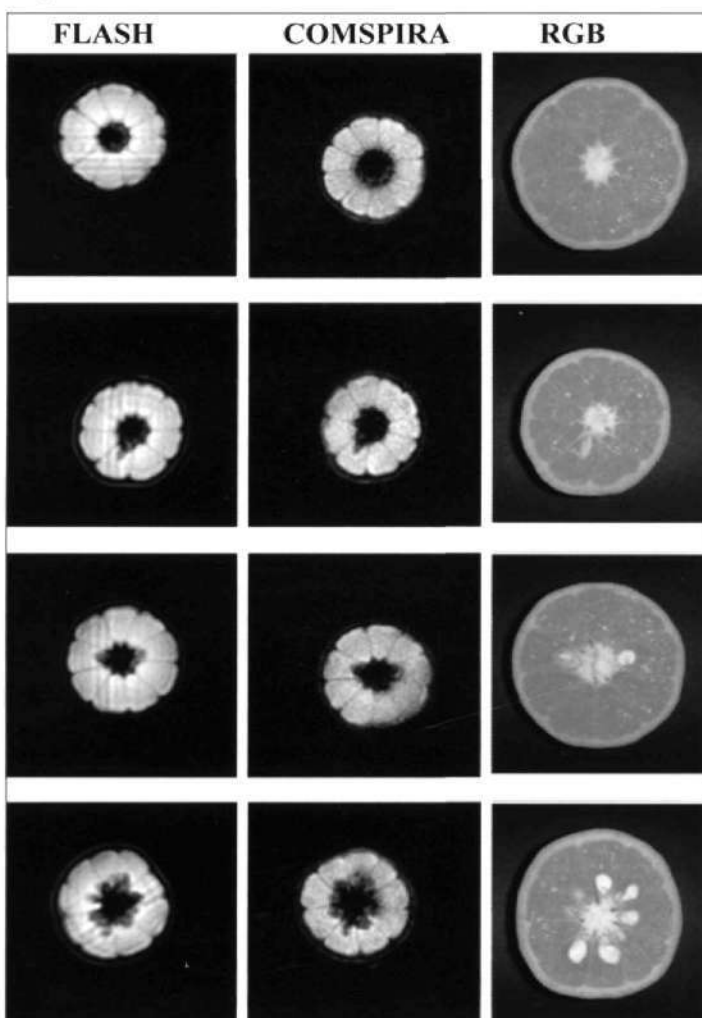


Figura 2. Ejemplos de imágenes FLASH con corrección de movimiento y COMSPIRA obtenidas de mandarinas enteras en movimiento; y respectivas imágenes RGB de la sección central del FOV.



lor 1 de espiralidad (240 ms). Ambos tipos de imágenes se reconstruyeron como 128×128 datos y el campo de visión fue de 12×12 cm con un ancho de corte de 10 mm.

El procesamiento de imagen se llevó a cabo con tres métodos. El primero, desarrollado por la UPM, está basado en la segmentación de regiones homogéneas en la que un umbral es obtenido mediante un proceso iterativo en el que se alcanza la estabilidad del área de la región segmentada. Los dos métodos propuestos por UCD están basados en la umbralización de la varianza de los histogramas unidimensional (1DHVT) y bidimensional (2DHVT, co-ocurrencia de dos valores de intensidad para el mismo pixel en dos imágenes: la original y la obtenida tras aplicar un filtro de mediana de 3×3 ; ZHENG *et al.*, 2006). Ambos métodos consisten en la maximización de la diferencia de la varianza de la intensidad entre dos clases según las funciones objetivo $\sigma(t)^2$ y $\sigma(k,l)^2$, correspondientes a 1DHVT y 2DHVT respectivamente (véase Fórmula 1), donde ω y μ son los momentos acumulados de orden cero y primero del histograma. Los valores $p(i)$ y $p(i,j)$ corresponden al histograma normalizado 1D y 2D respectivamente; y L el nivel máximo en la escala de grises (256).

Tras la segmentación se extrajeron de la región hipointensa (RHI) parámetros como el perímetro (P) y la distancia máxima desde el centro de gravedad a la periferia (R_{max}). Con ellos se validó y optimizó una función discriminante previa (HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ

et al., 2006). Además de estos parámetros, se calcularon el momento de segundo orden (SOM) para cuantificar la asimetría de RHI, la compacidad (C); y la relación entre longitud

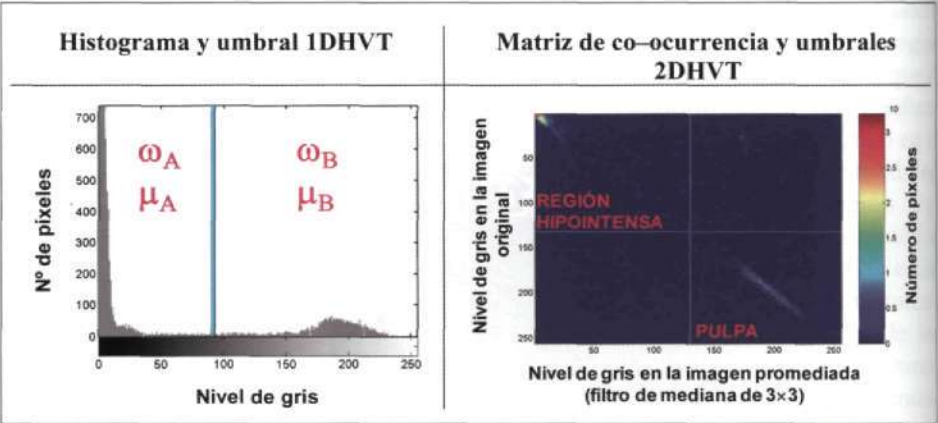
máxima y anchura máxima (*ASPECTO*) con la intención de identificar geometrías elongadas características de la presencia de una única semilla [(x_i, y_i) son las coordenadas del píxel i -ésimo en RHI, (x', y') son las coordenadas del centro de masas; y N es el número de píxeles de RHI] (Fórmula 2).

Resultados y discusión

La región correspondiente a las semillas y al eje central aparece en ambas imágenes, FLASH y COMSPIRA, como una región de señal de baja intensidad. En las imágenes COMSPIRA se aprecia un mayor contraste entre tejidos, propiciado por la rápida adquisición de los puntos centrales del espacio- k , donde está contenida la información sobre el contraste. Sin embargo, también se observa un nivel de ruido más alto, por lo que se recomienda aplicar un filtro de mediana para reducirlo. La ventaja que presenta sobre la secuencia FLASH es que la reducción significativa de tiempo de adquisición permite incrementar el número de frutos inspeccionados.

Un análisis de varianza mostró que existían diferencias significativas entre modalidades de segmentación para el umbral calculado así como para los distintos parámetros de la imagen ob-

Gráfico 1. Ejemplo de umbralización (línea azul) en un histograma unidimensional de valores de intensidad (izquierda) y de umbralización (líneas azules) en una matriz de co-ocurrencia de valores de intensidad (derecha).



tenidos, mientras que no aparecía influencia de la presencia de semillas en el valor del umbral.

El valor de umbral obtenido por el método UPM es generalmente menor y es más sensible al tipo de secuencia (Gráfico 2) mientras que por el método 1D-HVT los valores determinados son muy similares entre imágenes correspondientes a distintas secuencias. Las diferencias encontradas entre los umbrales de 1DHVT y 2DHVT (Gráfico 2) se atribuyen a que el primero maximiza la varianza entre clases mientras que el segundo, además, disminuye el número de

píxeles identificados como ruido o bordes.

La función de discriminación entre mandarinas con y sin semillas obtenida en un trabajo anterior (HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ *et al.*, 2006) utiliza los parámetros R_{max} y P para la clasificación de las muestras. La validación externa llevada a cabo en el presente trabajo obtuvo mejores resultados con la segmentación 2DHVT (Cuadro 1), de forma equivalente para las imágenes FLASH y COMSPIRA.

Para su optimización se obtuvo la correlación entre todos los parámetros

Cuadro 1. Porcentajes de mandarinas correctamente clasificadas en la validación externa de la función discriminante con R_{max} y P para imágenes FLASH aplicando los distintos métodos de segmentación. N se refiere al número de muestras en el estudio.

	Flash			N
	UPM	1DHVT	2DHVT	
Con semillas	45,8%	58,3%	73,9%	24
Sin semillas	100,0%	100,0%	94,5%	54
Total	83,3%	87,2%	91,0%	78

Cuadro 2. Porcentajes de mandarinas correctamente clasificadas con la función discriminante que incluye R_{max} , P y ASPECTO para imágenes FLASH y COMSPIRA aplicando el método de segmentación 2DHVT. N se refiere al número de muestras en el estudio.

	Flash		Comspira	
	2DHVT	N	2DHVT	N
Con semillas	95,8%	23	100,0%	10
Sin semillas	100,0%	54	100,0%	5
Total	98,7%	78	100,0%	15

Gráfico 2. Valores umbral extraídos por los distintos métodos de segmentación para las imágenes FLASH y COMSPIRA.

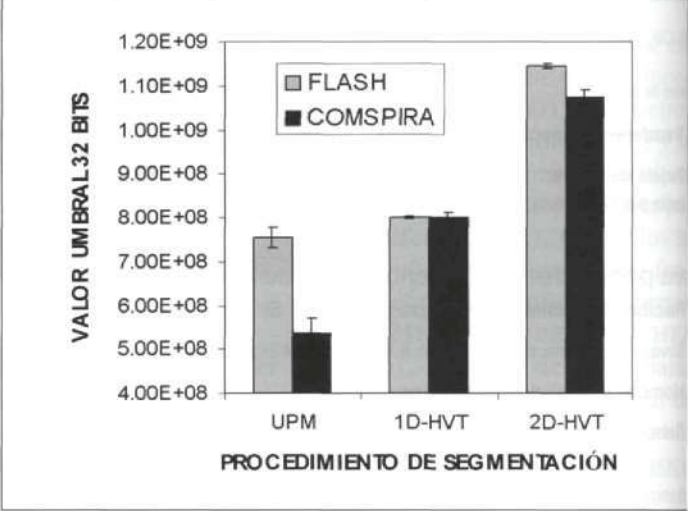
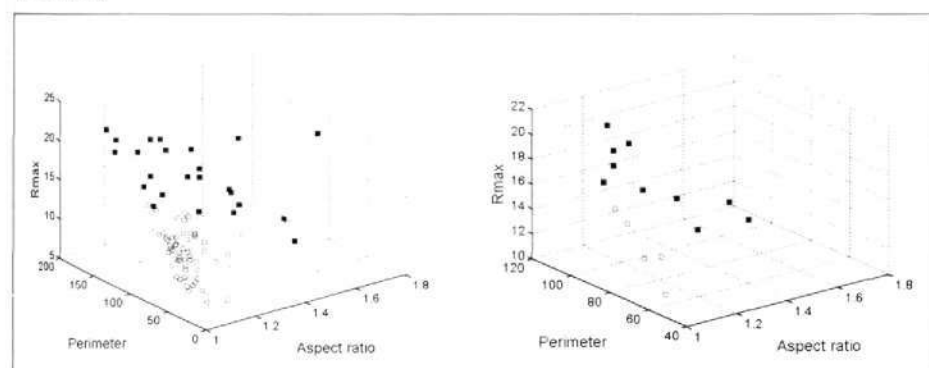


Gráfico 3. Representación en tres dimensiones de los parámetros calculados a partir de las imágenes FLASH (izquierda, N=78) y COMSPIRA (derecha, N=15) incluidos en la función discriminante. Cuadrados (■) corresponden a las mandarinas con semillas y círculos (○) corresponden a las mandarinas sin semillas.



extraídos de las imágenes segmentadas y se seleccionaron los menos correlacionados con R_{max} y P para ser incorporados en un nuevo análisis discriminante de forma que la información complementaria aportada por las variables añadidas no fuera redundante. El parámetro *ASPECTO* fue el seleccionado finalmente por el análisis (el Gráfico 3 muestra la representación de las tres variables incluidas en las nuevas funciones de discriminación).

El rendimiento de la clasificación aumentó considerablemente como se muestra en el Cuadro 2 alcanzando un 100% de mandarinas clasificadas correctamente para las imágenes COMSPIRA mientras que para las imágenes FLASH el porcentaje es del 98,7%.

Conclusiones

Tanto en las imágenes FLASH como en las COMSPIRA la umbralización por varianza del histograma bidimensional (2DHVT) ofrece el mejor resultado en la segmentación de semillas y posterior clasificación de muestras.

La mejora en la segmentación de la imagen favorece la extracción de nuevos parámetros morfológicos como la relación *ASPECTO* (relación entre altura y ancho) que permiten clasificar correctamente el 100% de las frutas en las imágenes COMSPIRA y el 98,7%

en las imágenes FLASH (95,8% de mandarinas con semillas bien clasificadas).



Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología la financiación del proyecto OPTISCAM y a la Comunidad de Madrid la financiación del proyecto TRAGRALIA que han permitido el desarrollo del presente trabajo.

Bibliografía

- DU C., SUN D.-W. (2004). Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. *Trends Food Sci. Technol.* 15(5), 230–249.
- HERNANDEZ-SANCHEZ N., BARREIRO P., RUIZ-ALTISENT M., RUIZ-CABELLO J., ENCARNACION FERNANDEZ-VALLE M.E. (2005 a). Detection of seeds in citrus using MRI under motion conditions and improvement with motion correction. *Concepts Magn. Reson. Part B* 26 (1), 81–92.
- HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ N., BARREIRO P., RUIZ-CABELLO J., (2006). Detection of seeds in mandarins using MRI under motion conditions. *Biosyst. Eng.*, 95 (4), 529–536.
- HILLS B.P., WRIGHT K.M. (2006). Motional relativity and industrial NMR sensors, *J. Magn. Reson.* 178(2), 193–205.
- ZHENG C., SUN D.-W., ZHENG L. (2006). Segmentation of beef joint images using histogram thresholding. *J. Food Process Eng.* (in press).